

# 鉄道の存在を考慮したコードンプライシングと土地利用規制

上戸 圭悟<sup>1</sup>・河野 達仁<sup>2</sup>

<sup>1</sup>学生非会員 東北大学大学院 情報科学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

E-mail:joto@plan.civil.tohoku.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 東北大学大学院教授 情報科学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

E-mail:kono@plan.civil.tohoku.ac.jp

本研究は鉄道と自動車の交通機関がある都市におけるコードンプライシングと土地利用規制(容積率(FAR)規制, 都市境界(UGB)規制)の同時最適化政策を分析する. 外部性は道路混雑のみを考慮する. 社会厚生を最大とする場合の分析結果として以下の4点を示す. 1) コードンの位置は床面積市場の歪みと地代で表される. 2) 課金額は床面積市場の歪み, コードンライン前後の自動車分担率とそのシャドープライスで表される. 3) 容積率規制はコードンラインの外側・内側の両方で引き上げ・引き下げ規制がある場合に加え, 外側・内側のどちらか一方で引き上げまたは引き下げ規制のみとなる可能性もある. 4) 都市境界規制は拡大・縮小の両方が存在しうる.

**Key Words :** congestion, cordon pricing, FAR regulation, UGB regulation

## 1. はじめに

今日, 多くの大都市で交通渋滞が発生し, 経済損失や環境負荷が問題になっている. 改善策として, 都市に流入する自動車に課金を行うコードンプライシングがあり, すでにシンガポールやオスロ等で導入されている. 一方, コードンプライシングとは別に容積率(FAR)規制や都市境界(UGB)規制などの土地利用規制も存在し, 各地点における人口密度を調整することで, 混雑による外部性を緩和できる.

これらの次善政策は同時最適化されるべきであり, Kono and Kawaguchi (2015)では, 自動車通勤のみを考慮したコードンプライシングとFAR, UGB規制の同時最適化を行っている

しかし, コードンプライシングを行っている都市には鉄道が存在する. コードンプライシングは鉄道と自動車の機関分担率を変化させ, 居住人口分布にも影響を与える. したがってコードンプライシングや土地利用規制の最適値を求めるには, 鉄道の存在を考慮する必要がある.

本研究では鉄道と自動車の機関分担を考慮したコードンプライシングと土地利用規制の同時最適化を行い, コードンの最適な課金額, 位置, 最適な容積率と都市境界規制の性質を導出する.

## 2. モデル

幅1の閉鎖都市を考える. 中心業務地区(CBD)との境である地点 $x=1$ から, 都市境界 $x=\bar{x}$ までに同質な $N$ 世帯が居住する. 各世帯から一人ずつCBDに通勤し, 鉄道か自動車を利用する. コードンライン $x_c$ において自動車を使用すると $\tau$ だけ課金される. なお, 最適コードンプライシングの分析結果の解釈を行うために, コードンラインにおける鉄道への課金 $\tau^{rail}$ を追加して行う政策もモデル化する.

各世帯の効用関数は $v = v(z + \sum_{j=1}^J \delta_j \varepsilon_j^{car}, q)$ で表され,  $z$ は合成財,  $\varepsilon_j^{car}$ はある期間 $J$ のうちの, ある1日 $j$ における鉄道に比した自動車の効用とし, 自動車を使用した場合 $\delta_j = 1$ , 鉄道を使用した場合 $\delta_j = 0$ とする. 合成財 $z$ と $\sum_{j=1}^J \delta_j \varepsilon_j^{car}$ に完全代替を仮定している.  $q$ は1世帯当たりの床面積であり,  $p$ はその価格である.  $F(x)$ を容積率,  $S(F(x))$ を建設費用とする. 下付き文字 $i, o$ はそれぞれ, コードンライン $x_c$ の内・外側を表し,  $area\ i \equiv [1, x_c]$ ,  $area\ o \equiv [x_c, \bar{x}]$ として, 非労働所得 $G$ は

$$G = \sum_{h \in \{i, o\}} \int_{area\ h} [F_h(x)p_h(x) - S(F_h(x))] dx + Jn_o^{car}(x_c)\tau + Jn_o^{rail}(x_c)\tau^{rail} \quad (1)$$

と表される。

次に  $t^{car}(x)$  を自動車,  $t^{rail}(x)$  を鉄道の交通費用として, 所得制約は以下のように表せる。

$$z + pq = y - \left\{ \sum_{j=1}^J \delta_j t^{car}(x) + \sum_{j=1}^J [1 - \delta_j] t^{rail}(x) \right\} + \frac{G}{N} \quad (2)$$

位置  $x$  における自動車と鉄道の交通費用の差を  $\kappa(x) = t^{car}(x) - t^{rail}(x)$  とし, 自動車利用率を  $\kappa(x)$ , 確率密度関数  $\chi(\varepsilon^{car})$  を用いて  $\Phi(\kappa(x)) = \int_{\kappa(x)}^{\infty} \chi(\varepsilon^{car}) d\varepsilon^{car}$  と定義する。

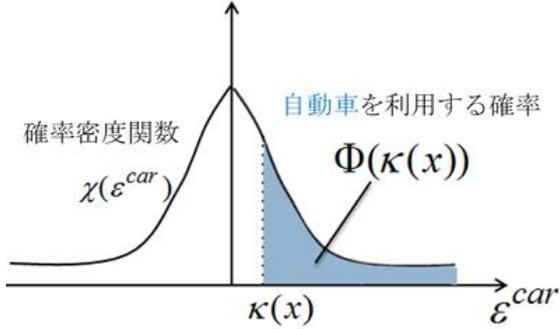


図-1 自動車の機関分担率

地点  $x$  における通勤者数  $n_h(x)$  は,

$$n_i(x) = \int_x^{x_c} \{F_i(s)/q_i(s)\} ds + \int_{x_c}^{\bar{x}} \{F_o(s)/q_o(s)\} ds \quad (3)$$

$$n_o(x) = \int_x^{\bar{x}} \{F_o(s)/q_o(s)\} ds \quad (4)$$

であり, 自動車の交通費用  $t_i^{car}$  は自動車通勤者数  $n_h^{car}(x)$ , 道路容量  $\rho_h(x)$  を用いて,

$$t_i^{car}(x) \geq \int_1^x c(n_i^{car}(s)/\rho_i(s)) ds \quad (5)$$

$$t_o^{car}(x) \geq t_i^{car}(x_c) + \int_{x_c}^x c(n_o^{car}(s)/\rho_o(s)) ds + \tau \quad (6)$$

鉄道通勤費用  $t_h^{rail}$  は, 傾き  $a$  の一次関数として

$$t_i^{rail} \geq a(x-1) \quad (7)$$

$$t_o^{rail} \geq a(x-1) + \tau^{rail} \quad (8)$$

と表せる。

次に市場均衡条件を記す。効用は各地点で等しく

$$v(x) = u \quad \forall x \in [1, \bar{x}] \quad (9)$$

式(3), (4)を微分して  $\Phi(\kappa(x))$  を使用すると

$$\dot{n}_h(x) = -F_h(x)/q_h(x), \quad h \in \{i, o\} \quad (10)$$

$$\dot{n}_h^{car}(x) = \dot{n}_h(x)\Phi(\kappa_h(x)), \quad h \in \{i, o\} \quad (11)$$

式(5)-(8)を微分して  $\kappa(x)$  を使用すると

$$\dot{i}_h^{car}(x) \geq c(n_h^{car}(m)/\rho_h(m)), \quad h \in \{i, o\} \quad (12)$$

$$\dot{i}_h^{car} - a - \dot{\kappa}_h(x) \geq 0, \quad h \in \{i, o\} \quad (13)$$

が得られる。位置  $x_c$  における境界条件は

$$n_i^{car}(x_c) = n_o^{car}(x_c) \quad (14)$$

$$t_o^{car}(x_c) = t_i^{car}(x_c) + \tau \quad (15)$$

$$-\kappa_i(x_c) + t_i^{car}(x_c) = -\kappa_o(x_c) + t_o^{car}(x_c) + \tau^{rail} \quad (16)$$

$$n_i(x_c) = n_o(x_c) \quad (17)$$

と表せる。

各世帯の効用の和である社会厚生  $W$  は,  $W = Nu$  で表され, コードンの位置, 課金額, 容積率規制, UGB規制によって決定される。これらの政策変数を次の最大化問題で求める。

$$[x_c, \tau, F(x), \bar{x}] = \arg \max_{x_c, \tau, F(x), \bar{x}} W \text{ s.t. eqs. (2), (9)-(17).}$$

ラグランジエ関数を用いて, この最大化問題を解く。

$$\begin{aligned} L = & \frac{Nu}{\eta} + \sum_{h \in \{i, o\}} \int_{area\ h} \lambda_h(x) \left[ i_h^{car}(x) - c \left( \frac{n_h^{car}(x)}{\rho_h(x)} \right) \right] dx \\ & + \sum_{h \in \{i, o\}} \int_{area\ h} \varphi_h(x) \left[ i_h^{car}(x) - a - \dot{\kappa}_h(x) \right] dx \\ & + \sum_{h \in \{i, o\}} \int_{area\ h} \mu_h(x) \left[ \dot{n}_h(x) + \frac{F_h(x)}{q \left( t_i^{car}(x), \kappa_i(x), G, u \right) + (G/N)} \right] dx \\ & + \sum_{h \in \{i, o\}} \int_{area\ h} \theta_h(x) \left[ \dot{n}_h^{car}(x) - \dot{n}_h(x)\Phi(\kappa_h(x)) \right] dx - G \\ & + \sum_{h \in \{i, o\}} \int_{area\ h} [F_h(x)p(t_i^{car}(x), \kappa_i(x), G, u) - S(F_h(x))] dx + J n_o^{car}(x_c) \tau \\ & + \phi [t_o^{car}(x_c) - t_i^{car}(x_c) - \tau] \\ & + \gamma [t_i^{car}(x_c) - \kappa_i(x_c) - t_o^{car}(x_c) + \kappa_o(x_c) + \tau^{rail}] \\ & + \psi [n_o(x_c) - n_i(x_c)] + \xi [n_o^{car}(x_c) - n_i^{car}(x_c)] \end{aligned} \quad (18)$$

$\lambda_h, \varphi_h, \mu_h, \theta_h, \phi, \gamma, \psi, h \in \{i, o\}$  はラグランジエ乗数である。また, ラグランジアンをを合成財の単位に換算するため,  $G$  のシャドープライスである  $\eta$  で式全体を割っている。

### 3. 分析結果

(18)式の1階条件から得られたコードンラインの最適な位置と課金額, 最適な容積率規制, UGB規制の最適位置に関する命題を示す。

$F_{h(x)}, n_h(x_c), n_h^{car}(x_c), h \in \{i, o\}$  に関する1階条件を用いると命題1が求まる。

#### 命題1(コードン課金公式)

コードンラインにおける自動車の最適課金額  $\tau$  は以下の式で表される。

$$\tau = \frac{1}{J\Phi(\kappa_o(x_c))} \left[ q_i(x_c) \left\{ \frac{p_i(x_c)}{-\frac{\partial S(F_i(x_c))}{\partial F_i(x_c)}} \right\} - q_o(x_c) \left\{ \frac{p_o(x_c)}{-\frac{\partial S(F_o(x_c))}{\partial F_o(x_c)}} \right\} + \theta_i(x_c) \{ \Phi(\kappa_i(x_c)) - \Phi(\kappa_o(x_c)) \} \right] \quad (19)$$

式(19)はコードンラインにおける自動車の最適課金額  $\tau$  が、コードンラインの直前・直後における容積率規制による1世帯当たりの床市場の歪みの差と、自動車を選択した際の効用の差を等しくする値であることを示す。自動車通勤のみを考慮した先行研究 Kono and Kawaguchi (2015)には最後の項が存在しない。

$r_h(x)$  を位置  $x$  における底地代とすると以下の式が成立する。

$$F_h(x_c) p_h(x_c) - S(F_h(x_c)) = r_h(x) \quad (20)$$

$x_c$  に関する1階条件と式(20)を用いると命題2が求まる。

**命題2(コードンライン位置公式)**

コードンラインの最適位置  $x_c$  は以下の式を満たすような値となる。

$$r_i(x_c) - r_o(x_c) = F_i(x_c) \left[ p_i(x_c) - \frac{\partial S_i(F_i(x_c))}{\partial F_i(x_c)} \right] - F_o(x_c) \left[ p_o(x_c) - \frac{\partial S_o(F_o(x_c))}{\partial F_o(x_c)} \right] \quad (21)$$

式(21)はコードンラインの最適位置  $x_c$  がコードンラインの直前・直後における底地代の差と容積率規制による死荷重の差が等しくなる位置で決定することを示す。これは Kono and Kawaguchi (2015)と同様である。

$F_h(x)$ ,  $h \in \{i, o\}$  に関する1階条件を用いると

$$\mu_h(x) = -q_h(x) \left[ p_h(x) - \frac{\partial S(F_h(x))}{\partial F_h(x)} \right], \quad (22)$$

が求まる。 $p_h(x) - \frac{\partial S(F_h(x))}{\partial F_h(x)}$  は、図-2のような1世帯当た

りの床市場の歪みの差である。

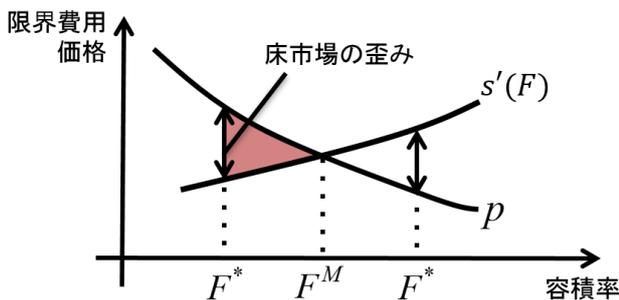


図-2 床市場の歪み

図-2から  $p_h(x) - \frac{\partial S(F_h(x))}{\partial F_h(x)}$  が正(負), つまり  $\mu_h(x)$  が

負(正)の場合, 容積率は市場均衡よりも引き下げる(引き上げる)べきであるとわかり, その符号に関する分析

から命題3が導かれる,

**命題3(最適容積率規制の性質)**

最適な容積率規制は、鉄道への課金を行わない場合、コードンラインの内・外側とともに市場均衡から引き上げ・引き下げの両規制が必要な場合や、内・外側の一方のみで引き上げ・引き下げの両規制が必要な場合など、複数のパターンが存在する。

鉄道への課金  $\tau^{rail}$  が存在する場合は、コードンラインの内・外側とともに引き上げ・引き下げの両規制が必要かつ内・外側それぞれで床面積市場の死荷重が0となる。

鉄道への課金が存在する場合はKono and Kawaguchi (2015)と同様の結果となる。

式(20), (21)を用いると命題4が求まる。

**命題4(コードンラインにおける容積率の連続性)**

$$F_i(x_c) = F_o(x_c) \quad (23)$$

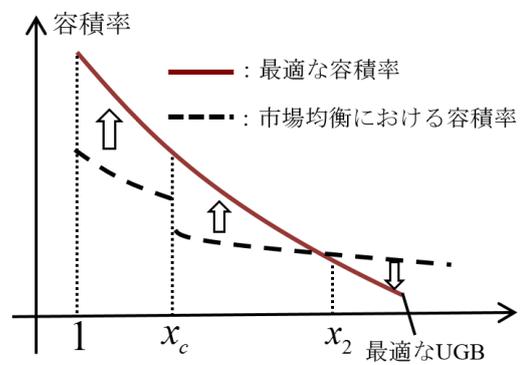
市場均衡におけるコードンライン直前と直後の容積率は異なるが、最適な容積率規制をかけた場合は一致する。都市境界  $\bar{x}$  における1階条件と  $\mu_o(\bar{x})$  の符号からUGBにおける底地代  $r_o(\bar{x})$  の符号が導かれ、命題5が求まる。

**命題5(最適都市境界規制の性質)**

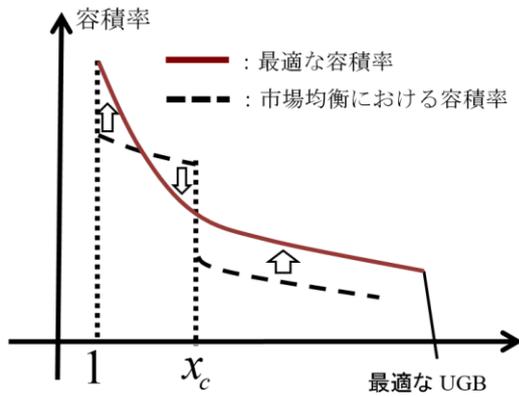
最適なUGB規制の位置は、 $\mu_o(\bar{x}) < 0$  の場合、市場均衡よりも縮小し、 $\mu_o(\bar{x}) > 0$  の場合、市場均衡よりも拡大する。

Kono and Kawaguchi (2015)ではUGBが市場均衡よりも縮小する場合のみが導出された。

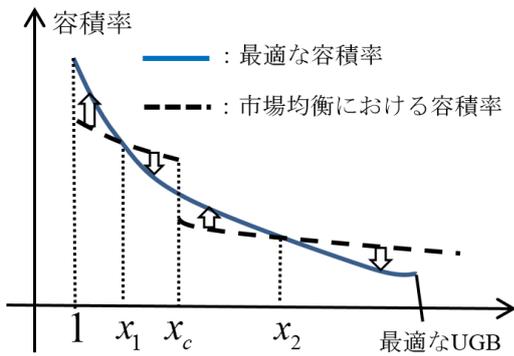
以下の図-3は、本分析における最適な土地利用規制の一例を図示し、先行研究と比較したものである。



本研究における最適規制パターン(その1)



本研究における最適規制パターン(その2)



Kono and Kawaguchi (2015)

図-3 最適な土地利用規制の先行研究との比較  
( $\tau^{rail}$  を考えない場合)

#### 4. 数値シミュレーション

総人口  $N = 100000$  (人), 収入  $y = 50000$  (\$), 建設費用  $S(F(x)) = (F(x)/0.0000629)^{1/0.5846}$  (\$/km<sup>2</sup>), 各ゾーンの交通費用  $t^c a \tau(x) = 531.7x - 212.648^{ar} x^{-2.126}$  (\$/km), 鉄道運賃  $a = 3000$  (\$/年・km),  $\tau^{rail} = 0$  と設定した際の数値シミュレーションの結果を表-1に示す. これは図-3の本研究における最適規制パターン(その1)を再現しており, 達成率は地点ごとに自動車に課金したFirst-bestに対するものである.

表-1 数値シミュレーションの結果

CBDからの距離 (km)	容積率 (コードンのみ)	容積率 (コードン+容積率規制)
0-0.5	5.7	7.4
0.5-1.0	4.7	5.5
1.0-1.5	3.2	3.3
1.5-2.0	2.7	2.5
2.0-4.0	1.5	1.4
4.0-6.0	1.1	0.93
6.0-7.0	0.79	0.67
コードン位置・額	1.0(km) 2723(\$/年)	1.0(km) 1803(\$/年)
達成率	80.8%	97.4%

表-2, 3, 4は鉄道運賃  $a$  を2000, 2500, 3000 (\$/年・km) と変化させ, 社会厚生, コードンの位置, 課金額, UGBの位置の違いを比較した感度分析の結果である. コードンプライシングと容積率規制による効果を明確にするため, コードンのみ, コードン+容積率規制を行う場合のUGB位置はFirst-bestにおける最適なUGB位置と同じにした.

鉄道運賃が低いほど交通費用が削減され, 都市が広がる. それによって一世帯辺りの床面積も広がるため社会厚生は高くなる.

表-2 感度分析の結果 ( $a = 2000$ )

	社会厚生 (10 <sup>8</sup> \$/yr)	コードン		UGB (km)
		位置 (km)	課金額 (\$/yr)	
市場均衡	1.1230 (0%)	-	-	9
First-best toll	1.1450 (100%)	-	-	8.75
コードンのみ	1.1422 (87.8%)	1.0	2035	8.75
コードン+容積率規制	1.1443 (97%)	1.0	1280	8.75

表-3 感度分析の結果 ( $a = 2500$ )

	社会厚生 (10 <sup>8</sup> \$/yr)	コードン		UGB (km)
		位置 (km)	課金額 (\$/yr)	
市場均衡	1.0704 (0%)	-	-	7.75
First-best toll	1.0967 (100%)	-	-	7.75
コードンのみ	1.0924 (83.4%)	1.0	2326	7.75
コードン+容積率規制	1.0962 (97.9%)	1.0	1125	7.75

表-4 感度分析の結果 ( $a = 3000$ )

	社会厚生 (10 <sup>8</sup> \$/yr)	コードン		UGB (km)
		位置 (km)	課金額 (\$/yr)	
市場均衡	1.0245 (0%)	-	-	7
First-best toll	1.0561 (100%)	-	-	7
コードンのみ	1.0500 (80.8%)	1.0	2723	7
コードン+容積率規制	1.0552 (97.4%)	1.0	1803	7

## 5. 結論

本研究では鉄道と自動車の存在を考慮した場合のコー  
ドンプライシングと土地利用規制の同時最適化を行った。  
自動車通勤のみを考慮した Kono and Kawaguchi (2015)と  
は異なる最適課金額  $\tau$  の公式と容積率規制, 都市境界規  
制のパターンが導出された。これは, 自動車利用者に課金  
をしても鉄道利用も可能なため, レントが安くなる郊外  
に居住しようとする通勤者も出てくる。それによって生  
まれる床面積市場での死荷重や, 混雑の外部性を緩和す  
るためである。

### 参考文献

- 1) Arnott, R., & Yan, A. (2000). The Two - Mode Problem: Second - Best Pricing and Capacity. *Review of urban & regional development studies*, 12(3), 170-199.
- 2) Kono, T., Joshi, K.K., Kato, T., Yokoi, T., 2012. Optimal regulation on building size and city boundary: An effective second-best remedy for traffic congestion externality. *Regional Science and Urban Economics* 42, 619-630.
- 3) Kono, T., Kawaguchi, H., 2015. Cordon Pricing and Land Use Regulation. *Scandinavian Journal of Economics*, in press.
- 4) Pines, D., Kono, T., 2012. FAR regulations and unpriced transport congestion. *Regional Science and Urban Economics* 42, 931-937.
- 5) Romeo Danielis, Edoardo Marcucci., 2002. Bottleneck road congestion pricing with a competing railroad service. *Transportation Research Part E* 38, 379-388.
- 6) Sasaki, K., 1986. Transportation System Change and Urban Structure in Two-Transport Mode Setting, *Journal of Urban Economics*, 346-367.
- 7) Tabuchi, T., 1993. Bottleneck congestion and modal split. *J. Urban Economics* 34, 414-431.
- 8) Verhoef, E.T., 2005. Second-best congestion pricing schemes in the monocentric city. *Journal of Urban Economics* 58, 367-388.

(2016. 7. 20 受付)

## Cordon Pricing and Land Use Regulation with Railways

Keigo JOTO, Tatsuhito KONO